Vorgehensweisen zur Vorhersage menschlicher Bewegung durch muskuloskelettale Simulation

Alexander Wolf, Jörg Miehling, Sandro Wartzack
Lehrstuhl für Konstruktionstechnik;
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Abstract

Musculoskeletal simulations are holding the capability to quantify man-machine interactions of systems which are not build yet. Thus, they have the capability to be an important CAE-tool in product development. The most common approach of musculoskeletal simulations is the inverse dynamic analysis. Unfortunately this approach has view disadvantages, which are the main reason why musculoskeletal simulations are not in broad application yet. The main disadvantage is that measurements have to take place for every simulation. To overcome the measurements for inverse dynamics, movement and external forces have to be predicted. We present two approaches for motion prediction and describe which of them is more suitable to match the needs of product development.

Keywords: musculoskeletal simulation, posture- and movement-prediction, human centered design, man–machine interaction

1 Einleitung und Motivation

Die Produktentwicklung hat sich im Laufe des vergangenen Jahrhunderts rasant entwickelt und ist zu einem immer wichtigeren Aspekt für die Wettbewerbsfähigkeit von modernen Unternehmen geworden. Mithilfe neuer Methodik, Technik und neuen Arbeitsweisen soll die Produktentwicklung weniger

Kosten verursachen und in möglichst kurzer Zeit stattfinden. Dennoch soll darunter die schlussendliche Qualität bzw. Reife des Produktes nicht leiden. Ein Meilenstein für die Umsetzung dieser zunächst widersetzlich erscheinenden Ansprüche war die Möglichkeit das Produkt rechnerintern abbilden zu können. Mittels mannigfaltiger CAx-Anwendungen ist es gegenwärtig möglich, die funktionalen Anforderungen an ein Produkt weitestgehend abzusichern, bevor dieses überhaupt real existiert. Dadurch können die ehemals notwendigen Iterationsschleifen der Produktentwicklung [1], gerade in Hinblick auf reale Tests, auf ein erforderliches Minimum reduziert werden. Eine weitere Minimierung dieser nach wie vor erforderlichen Tests wird auch in Zukunft die Motivation für die Weiterentwicklung der Produktentwicklung darstellen. Auf Seiten der virtuellen Repräsentation des Produktes ist diesbezüglich vieles ermöglicht worden. Umso mehr verwundert es, dass der virtuellen Abbildung des Menschen, welcher das Produkt schlussendlich nutzen soll, in der Produktentwicklung vergleichsweise wenig Aufmerksamkeit zukommt. Im Rahmen von Usability Tests oder ähnlichem wird die Interaktion des Menschen mit dem Produkt auch gegenwärtig von den meisten Unternehmen erstaunlich spät im Produktentwicklungszyklus betrachtet. Dabei ist die Mensch-Maschine-Interkation als entscheidendes Bewertungskriterium für die Akzeptanz des Produktes beim Nutzer zu sehen. Im Rahmen der nutzerzentrierten Produktenwicklung möchte deshalb eben diese Mensch-Maschine-Interaktion frühzeitig und dementsprechend virtuell berücksichtigt werden. Daraus leitet sich die Frage ab, warum dies gegenwärtig noch keine gelebte Praxis ist, obwohl unterschiedlichste virtuelle Nutzermodelle existieren. Im Rahmen dieses Beitrags wird für den Fall der biomechanischen bzw. muskuloskelettalen Menschmodelle auf diese Frage eine Antwort gefunden. Ferner werden Ansätze präsentiert, welche eine Auflösung dieses Umstandes ermöglichen können.

2 Muskuloskelettale Simulation

Mittels muskuloskelettaler Simulationsprogramme, wie dem AnyBody Modeling System [2] oder Open Sim [3], kann der menschliche Bewegungsapparat virtuell abgebildet und berechnet werden. Dadurch werden zahlreiche Analysen möglich, welche die Produktentwicklung unterstützen können. Zunächst ist ein muskuloskelettales Modell auch ein anthropometrisches Modell, das mittels Skalierung verschiedenste Nutzgruppen abbilden kann [4]. Hierdurch können einfache Raumbedarfsanalysen, aber auch Bewegungsumfanganalysen und Sichtanalysen durchgeführt werden. Der Fokus der muskuloskelettalen Simulation liegt allerdings auf der Analyse der körperinneren Beanspruchungen, welchen der menschliche Körper unter Ausführung einer Interaktion bzw. Bewegung ausgesetzt wird. Diese Beanspruchungen können genutzt werden, um eine Bewertung des Diskomforts bzw. der Ergonomie einer

Interaktion abzuleiten. Dadurch kann die Entwicklung und Konstruktion eines Produktes bereits frühzeitig auf eine komfortable bzw. ergonomische Benutzung angepasst werden. Ein klassisches Beispiel hierfür wäre die Bewertung des Komforts beim Fahren in einem Automobil [5]. Ferner können Produktparameter gezielt eingestellt werden, um gewünschte Belastungen bzw. Entlastungen des Menschen zu erreichen. Hier wäre beispielhaft die Entwicklung von Sport- und Trainingsgeräten oder die Auslegung von Exoskeletten anzuführen. Auch für die Entwicklung medizintechnischer Produkte birgt die muskuloskelettale Simulation einiges an Potential. Die Berechnung der körperinneren Beanspruchungen geschieht in muskuloskelettalen Modellen für jeden Muskel, jeden Knochen bzw. jedes Gelenk. Daher können detaillierte Daten erhoben werden, welche ansonsten nur indirekt am Menschen erfasst werden können. So kann beispielsweise die Beanspruchung eines Gelenkes für gewisse Alltagsbewegungen berechnet und ein Implantat anhand der daraus gewonnenen Erkenntnisse entwickelt werden. Neben der Produktentwicklung findet die muskuloskelettale Simulation auch in der Arbeitsplanung/ Arbeitssicherheit, Sportmedizin, Medizin und vielen weiteren Disziplinen Anwendung.

Mit all diesen Analysemöglichkeiten kann die Biomechanik des Menschen nutzbringend in die virtuelle Produktentwicklung integriert werden. Dennoch werden muskuloskelettale Simulationen im industriellen Umfeld praktisch nicht eingesetzt. Gegenwärtig prägen höchstens rein anthropometrische Modelle oder pseudo-biomechanische Modelle die virtuelle Arbeitsumgebung des Produktentwicklers [6]. Die Gründe hierfür müssen zunächst im Stand der Wissenschaft und damit in der Standardvorgehensweise der muskuloskelettalen Simulation gesucht werden. Die Abbildung des Bewegungsapparates findet durch das muskuloskelettale Modell mittels eines Mehrkörpersystems statt. Dabei werden die Knochen durch starre Körper repräsentiert und über Gelenke miteinander verbunden. Die Muskeln werden durch pfadgeführte Aktuatoren abgebildet. Die Dynamik des Mehrkörpersystems wird über eine Bewegungsdifferentialgleichung bestimmt [7]. Die Lösung der Differentialgleichung geschieht zumeist mithilfe der invers dynamischen Methode. Diese hat zum Ziel die körperinneren Kräfte, sprich Muskel- und Gelenkreaktionskräfte, zu berechnen. Dafür wird ein muskuloskelettales Modell mit sämtlichen Massen, Trägheiten, kinematischen Zwangsbedingungen sowie einer modellhaften Abbildung der Muskeln benötigt. Dieses Modell wird durch die bereits genannten Simulationsprogramme der muskuloskelettalen Simulation bereitgestellt. Als weitere Eingangsdaten werden sowohl Bewegungsdaten, als auch Messdaten der äußeren Kräfte benötigt. Mithilfe dieser lässt sich die Differentialgleichung für jeden Zeitschritt einer Bewegung lösen, wobei die hierfür benötigten Kraftanteile der einzelnen Muskeln mittels eines Optimierungsverfahrens aufgelöst werden [2]. Diese Vorgehensweise birgt einen großen Nachteil.

Um eine Interaktion invers dynamisch berechnen zu können, ist eine Messung der zugehörigen Bewegung sowie der Kräfte zwischen Mensch und Umwelt nötig. Ist eine solche Messung erfolgt, beschreibt diese allerdings nur eine konkrete Bewegung bzw. Interaktion. Soll eine neue oder optimierte Interaktion analysiert werden, muss für diese eine neue Messung erfolgen. Gerade in frühen Produktentwicklungsphasen wären daher viele Messungen von Nöten, um beispielsweise verschiedene Konzepte oder unterschiedliche Konstruktionen iterativ zu analysieren. Dies erfordert einen höheren Zeit- und Kostenaufwand, als es der Nutzen rechtfertigen kann. Müssen reale Messungen durchgeführt werden, ist zudem keine rein virtuelle Abbildung der Nutzer-Produkt-Interaktion möglich, was einer frühzeitigen Absicherung von nutzerzentrierten Produktanforderungen im Wege steht. Die Notwendigkeit von Messungen ist deshalb als entscheidender Schlüsselfaktor zu verstehen, weshalb die muskuloskelettale Simulation in der Anwendung so wenig verbreitet ist.

3 Vorhersage der Eingangsdaten

Damit der muskuloskelettalen Simulation der Einzug in die Produktentwicklung ermöglicht werden kann müssen die Probleme dieses Schlüsselfaktors gelöst werden. Im Folgenden sollen deshalb Ansätze vorgestellt werden, mit welchen sich die Problematik der benötigten Messungen umgehen lässt. Diese Ansätze beruhen auf der Annahme, dass sich die benötigten Eingangsdaten vorhersagen bzw. synthetisieren lassen, sodass deren Messung nicht mehr von Nöten ist. Durch die virtuelle Synthese des Nutzerverhaltens wäre eine rein virtuelle Abbildung der Nutzer-Produkt-Interaktion möglich. Im Falle der inversen Dynamik muss die zu untersuchende Bewegung synthetisiert und die zugehörigen äußeren Kräfte vorhergesagt werden. Auf dem Gebiet der Kraftvorhersage in muskuloskelettalen Systemen wurde von FLUIT et al. [8] eine vielversprechende Methode vorgestellt, welche im wissenschaftlichen Umfeld bereits Anwendung findet [9]. Diese Methode ist für viele Fälle anwendbar und erzeugt realistische Ergebnisse, insofern eine konsistente Bewegung vorliegt. Für die Erzeugung von Bewegungen hingegen existieren lediglich konzeptionell ausgeprägte Ansätze, die selbst im wissenschaftlichen Umfeld nur sporadische Anwendung finden. Grundsätzlich ist das muskuloskelettale Modell selbst hervorragend geeignet um realistische Bewegungserzeugungen zu ermöglichen, da dieses den Bewegungsapparat beschreibt und somit die Freiheitsgrade und Einschränkungen des menschlichen Körpers, in Verbund mit deren Dynamik abbildet. Aufgrund dieser Eignung existieren unterschiedliche Ansätze, die das muskuloskelettale Modell zur Bewegungserzeugung nutzen.

Neben der bereits erwähnten invers dynamischen Methode kann die Bewegungsdifferentialgleichung auch mittels der vorwärtsdynamischen Methode gelöst werden. Diese nutzt gegenläufig zur inversen Dynamik die Muskelkräfte und äußeren Kräfte als Eingangsdaten, um daraus eine Bewegung mit zugehörigen Gelenkreaktionskräften zu erzeugen. Dies ist zwar der offensichtlichste Ansatz zur Bewegungserzeugung, allerdings ist dieser für die Produktentwicklung unsinnig, da von den Muskelkräften auf eine Interaktion geschlossen wird und nicht andersherum. Ferner setzt der vorwärtsdynamische Ansatz voraus, dass die Muskelkräfte bekannt sind. Jene zu messen stellt allerdings eine enorme Herausforderung dar. Dieser Nachteil kann zwar mittels der Methode der Optimalsteuerung umgangen werden, allerdings entpuppen sich hierbei die anspruchsvolle Modellierung und die Rechenzeit als problematisch. ACKERMANN und VAN DEN BOGERT [10] ist die Bewegungserzeugung einer zweidimensionalen Laufbewegung gelungen. Für dieses Modell war es möglich die Rechenzeit unter einer Stunde zu halten. Für ein dreidimensionales Ganzkörpermodell hingegen sind höhere Rechenzeiten zu erwarten. Die Vorwärtsdynamik kann damit nicht das Mittel der Wahl zur effizienten Bewegungsvorhersage sein. Aus dieser Erkenntnis heraus haben sich basierend auf der invers dynamischen Methode zwei weitere Ansätze entwickelt, welche im Hinblick auf die Produktentwicklung vielversprechend erscheinen. Im Folgenden sollen diese vorgestellt und bewertet werden. Dazu werden die Ansätze im muskuloskelettalen Simulationsprogramm AnyBody Modeling System implementiert. Durch die hieraus gewonnenen Erkenntnisse wird zusammen mit Erfahrungen aus der Literatur eine Bewertung der Ansätze, im Hinblick auf eine alltagstaugliche Anwendung in der Produktentwicklung möglich.

3.1 Invers-invers dynamischer Ansatz

Der invers-invers dynamische Ansatz wurde von RASMUSSEN [11] vorgestellt. Der Ansatz beruht auf der Annahme, dass sich der menschliche Körper entsprechend eines Bewegungskriteriums bewegt. Als Bewegungskriterium kann beispielsweise formuliert werden, dass sich der Körper stets mit minimalem Energieaufwand zu bewegen versucht. Der Energieaufwand einer analysierten Bewegung kann aus den Muskelkräften abgeleitet werden, welche die inverse Dynamik als Ergebnis ausgibt. Da die Bewegung mathematisch beschrieben ist, lässt sich diese parametrisieren. So lassen sich beispielsweise die Werte der Gelenkwinkel zu jedem Zeitschritt als Parameter definieren. Diese Parameter können als Entwurfsvariablen fungieren, während das Bewegungskriterium als Zielfunktion formuliert werden kann. Mit diesen Voraussetzungen lässt sich ein Optimierungsproblem definieren, welches versucht die Bewegungsparameter so zu optimieren, dass das Bewegungskriterium bestmöglich erfüllt wird (Bild 1). Den bisherigen Beispielen folgend würden dem-

nach die Gelenkwinkel für jeden Zeitschritt so optimiert, dass die daraus entstehende Bewegung mit minimalstem Energieaufwand ausgeführt wird.

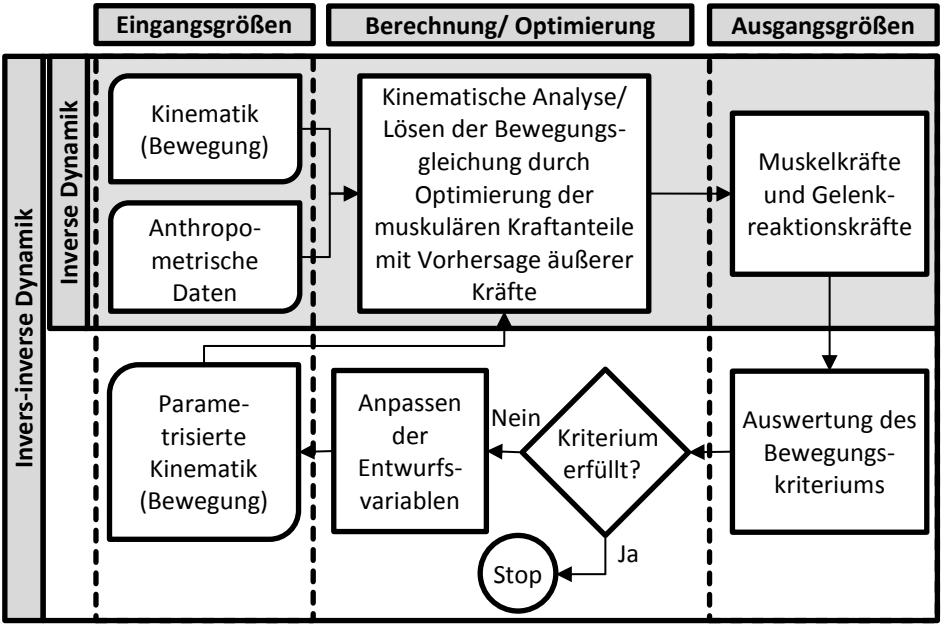

Bild 1: Schematischer Ablauf der invers-inversen Dynamik nach FARAHANI [12]. Die Vorhersage der äußeren Kräfte findet nach FLUIT [8] statt

Für eine erste Bewertung dieses Ansatzes wurde eine Körperhaltungserzeugung nach dem invers-invers dynamischen Ansatz durchgeführt. Als repräsentative Körperhaltung wurde dazu der Liegestütz gewählt. Das angestrebte Ziel war es, ausgehend von einer Körperhaltung am tiefsten Punkt des Liegestützes, eine möglichst unangestrengte Liegestützhaltung zu erzeugen. Dazu wurden ausgewählte Gelenkwinkel als Entwurfsvariablen parametrisiert. Als Zielfunktion wurde die maximale Muskelaktivität minimiert. Dabei wird davon ausgegangen, dass eine Reduktion der maximalen Muskelaktivität zu einer weniger anstrengenden Körperhaltung führt. Dadurch war das erforderliche Optimierungsproblem definiert. Nach diesem sollten die Gelenkwinkel mit jedem Optimierungsschritt so eingestellt werden, dass die Muskeln sukzessive entlastet werden.

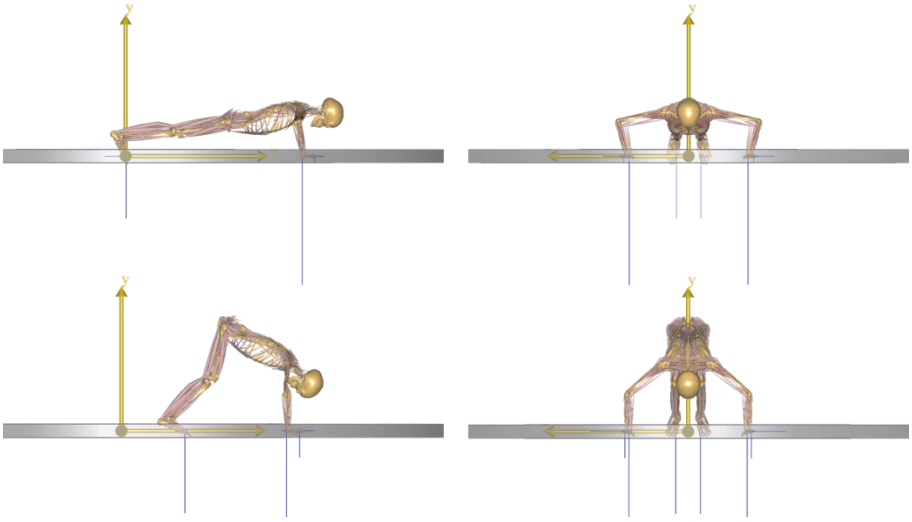

Bild 2: Anstrengende Ausgangskörperhaltung (oben) und entlastete, synthetisch erzeugte bzw. optimierte Körperhaltung (unten)

Die dadurch erzeugte Körperhaltung stimmte weitestgehend mit der zu erwartenden Körperhaltung überein (Bild 2). Dass dieser Ansatz auch für Bewegungserzeugungen genutzt werden kann zeigte FARAHANI [12], indem er unter anderem einen Sprung erzeugte. Aus der Erzeugung der Körperhaltung lassen sich allerdings schon erste Eigenschaften ableiten, welche gegen eine Anwendung des invers-invers dynamischen Ansatzes in der Produktentwicklung sprechen. Zunächst ist hierbei die Rechenzeit zu nennen. Auf einem zeitgemäßen Desktop-Rechner war die Erzeugung der vorgestellten Körperhaltung nie unterhalb von 5 Stunden möglich. Diese Erkenntnis wird durch die Untersuchungen von FARAHANI gestützt, welcher Wochen an Berechnungszeit für die Bewegungserzeugung benötigte. Zusätzlich ist das Erstellen der Modelle aufwändig. Das Finden einer geeigneten Zielfunktion ist dabei als große Herausforderung zu sehen. Ferner müssen Vereinfachungen in der Bewegungserzeugung in Kauf genommen werden, um im Entwurfsraum dieser hochgradig nichtlinearen Optimierung eine effektive Suche nach dem Optimum durch einen Suchalgorithmus zu ermöglichen.

3.2 Rousseau Modelle

Die Bezeichnung Rousseau Modell wurde an der Aalborg University geprägt [13] und bezieht sich auf ein Zitat des französischen Philosophen Jean-Jaques Rousseau aus dem 18. Jahrhundert. Das Zitat lässt sich aus dem

Französischem sinngemäß wie folgt übersetzen: „Der Mensch ist frei, doch überall liegt er in Ketten". Dieses ursprünglich eher philosophisch zu interpretierende Zitat lässt auch eine mechanische Interpretation zu. Möchte oder muss ein Mensch sich bewegen, so müssen gewisse äußere Zwänge eingehalten werden, welche die Bewegungsmöglichkeiten des menschlichen Körpers einschränken (Bild 3). Um aus den verbleibenden Bewegungsmöglichkeiten eine realistische Bewegung zu erzeugen, gilt es zusätzliche kinematische Bewegungsvorgaben zu treffen. Die äußeren Zwänge, sowie die Bewegungsvorgaben können in der muskuloskelettalen Simulation als zeitabhängige kinematische Randbedingungen umgesetzt werden. Durch die Einführung all dieser Randbedingungen ist das Menschmodell kinematisch überbestimmt, da die Vorgaben der jeweiligen Randbedingungen mit sich selbst und mit den Vorgaben der Gelenkwinkelwerte des Menschmodelles in Konflikt stehen. Im Rahmen einer überbestimmten inversen Kinematik [14] können diese Randbedingungen mithilfe eines Optimierungsverfahrens und unterschiedlichen Gewichtungsfunktionen so aufgelöst werden, dass eine realitätsnahe Bewegung entsteht. Das kinematische Optimierungsverfahren versucht dabei für jeden Zeitschritt, den bestmöglichen Kompromiss zwischen den Randbedingungen und den vorgegebenen Gelenkwinkeln zu finden [13]. Die Bewegungserzeugung findet demnach rein kinematisch statt. Die erzeugte Bewegung fungiert daraufhin als Eingangsgröße zur Berechnung der inversen Dynamik.

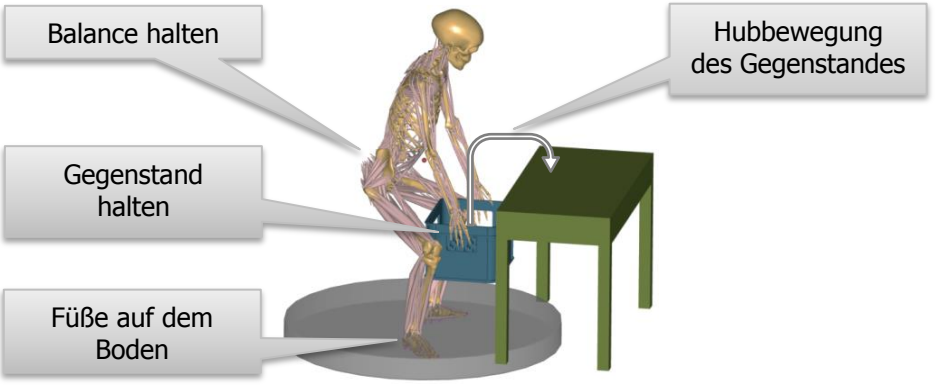

Bild 3: Darstellung der äußeren Zwänge bei einer Hebebewegung

Für die Bewertung dieses Ansatzes wurde eine Hebebewegung synthetisiert. Dazu mussten zunächst die äußeren Zwänge als Randbedingungen definiert werden. Zur Positionierung des Menschmodells im Raum sollten sich die Füße auf dem Boden befinden. Weiterhin sollte sich der Massenschwerpunkt

des Menschen im Verbund mit dem gehobenen Gegenstand stets oberhalb der Standfläche zwischen den Füßen aufhalten, um die Balance der Bewegung zu gewährleisten. Als weiterer Zwang müssen sich die Hände des Menschmodells an den Angriffspunkten des zu hebenden Gegenstandes befinden. Der Gegenstand wiederum soll eine zeitabhängige Hubbewegung durch den Raum vollführen (Bild 3). Durch die Verbindung des Menschmodells mit dem bewegten Gegenstand wird das Menschmodell dazu veranlasst sich zu bewegen. Trotz all dieser Randbedingungen verbleiben noch einige Möglichkeiten wie die Bewegung schlussendlich ausgeführt werden kann. Deshalb muss eine kinematische Bewegungsvorgabe gewählt werden. Es wurde vorgegeben, dass sich zusätzlich zum Gegenstand auch der Massenschwerpunkt des Körpers anhebt. Durch Umsetzung dieser Annahme in eine zeitabhängige kinematische Randbedingung wird eine Hebebewegung aus den Knien heraus erzeugt, bei welcher das Modell die Beine beim Heben immer weiter durchstreckt. Die Randbedingungen wurden mit hohen Gewichtungsfaktoren versehen, während die Zwangsbedingungen, welche die Gelenkwinkelwerte vorgeben, mit eher geringen Gewichtungsfaktoren versehen wurden. Dadurch ist gewährleistet, dass die überbestimmte inverse Kinematik die vorgegebenen Gelenkwinkelwerte zugunsten der Einhaltung der Randbedingungen verletzen darf. Für jeden Zeitschritt werden demnach die Gelenkwinkel an die – zum Teil zeitabhängigen – Randbedingungen angepasst, wodurch eine Bewegungserzeugung möglich wird (Bild 4).

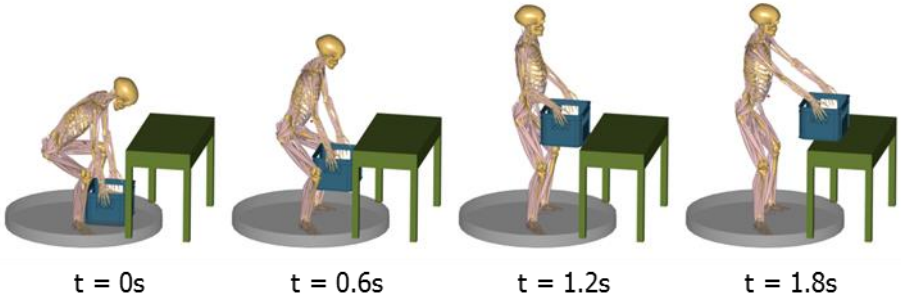

Bild 4: Zeitliche Abfolge der synthetisierten Hebebewegung

Diese erzeugte Bewegung erscheint plausibel und war mit relativ geringem Aufwand zu erstellen. Als großer Vorteil stellte sich die benötigte Rechenzeit heraus. Auf einem zeitgemäßen Desktop-Rechner war die Bewegungserzeugung in unter fünf Minuten zu realisieren.

4 Ergebnisbewertung

Der invers-invers dynamische Ansatz ist wissenschaftlich äußerst interessant, da durch diesen eine realistische Bewegungserzeugung ermöglicht werden könnte. Dieser Ansatz kann potentiell zur Erzeugung einfacher Körperhaltungen in der Produktentwicklung genutzt werden. Für eine alltagstaugliche Bewegungserzeugung hingegen, disqualifiziert sich dieser Ansatz durch die hohen Rechenzeiten und die aufwändige Modellierung. Die Rousseau Modelle zeichnen sich im Gegensatz dazu mit kurzen Rechenzeiten und einer vergleichsweise einfachen Modellierung aus. Diese Vorteile ergeben sich aus der grundsätzlichen Art der Bewegungserzeugung. Während beim invers-invers dynamischen Ansatz ein hochgradig nichtlineares Optimierungsproblem gelöst werden muss, wird die Bewegungserzeugung mittels Rousseau Modellen durch das Finden eines Kompromisses zwischen konkreten kinematischen Vorgaben realisiert. Daraus ergibt sich allerdings der Nachteil, dass der Realismus der erzeugten Bewegung stark von der Auslegung der Bewegungsvorgaben abhängig ist. Zur Erzeugung realistischer Bewegungen ist demnach ein gewisses a-priori Wissen über die entsprechenden Bewegungen von Nöten. Diese Unkenntnis könnte wiederum durch eine äußere Optimierung mit Ergebnissen der inversen Dynamik kompensiert werden. Dieser Ansatz wäre dem der invers-inversen Dynamik allerdings sehr ähnlich und würde die damit verbundenen Nachteile mit sich führen. Glücklicherweise kann im Falle der Nutzer-Produkt-Interaktion ein Teil dieses a-priori Wissens aus der Interaktion selber abgeleitet werden. Bei der Hebebewegung war beispielsweise bekannt, von welchem und an welchen Ort der Kasten gehoben werden sollte. Mithilfe solcher Vorgaben und weiteren Annahmen lassen sich plausible Bewegungen generieren. Die Validierung dieser Bewegungserzeugung kann über die Überprüfung der Evidenz der Ergebnisse der inversen Dynamik geschehen. Dazu müssen die Ausgangsgrößen der inversen Dynamik, welche mittels einer synthetisierten Bewegung berechnet wurden, mit empirischen Werten verglichen werden. Hierbei ist sicherlich auch ein Vergleich mit den Ergebnissen aus dem Standardvorgehen mittels Messungen interessant. Diese Validierungen stehen allerdings noch aus und werden Inhalt zukünftiger wissenschaftlicher Untersuchungen werden.

5 Fazit

Resümierend kann festgehalten werden, dass die Rousseau Modelle einen lohnenswerten Ansatz zur Etablierung der biomechanischen Simulation in der Produktentwicklung darstellen. Die vergleichsweise kurzen Rechenzeiten und die einfache Modellerstellung lassen die Hoffnung aufkommen, dass dieser Ansatz auch in der alltäglichen Anwendung zum Einsatz kommen kann. Durch

die Beschreibung der Bewegung durch Randbedingungen können ferner parametrische Modelle [15] aufgebaut werden. Mit jenen wäre es dem Produktentwickler möglich, durch die Wahl einfacher Parameter, eine Bewegung für die jeweils gewünschte Interaktion zu erzeugen. Aufgrund all dieser Eigenschaften lässt sich durchaus die These formulieren, dass es durch den geschickten Einsatz von Rousseau Modellen möglich werden kann, auch schon in frühen Produktentwicklungsphasen eine Absicherung der Nutzer-Produkt-Interaktion zu berücksichtigen, ohne dabei aufwändige Messungen betreiben zu müssen.

Danksagung

Diese Forschungs- und Entwicklungsarbeit wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) im Rahmen des Zentralen Innovationsprogramms Mittelstand (ZIM) gefördert. Die Betreuung dieses Projektes wird von der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) geleistet. Dafür sei an dieser Stelle gedankt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Literatur

[1] PAHL, G., et al.: *Konstruktionslehre* : *Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung ; Methoden und Anwendung*. 7. Aufl. Berlin : Springer, 2007 (Springer-Lehrbuch)

[2] DAMSGAARD, M., et al.: *Analysis of musculoskeletal systems in the AnyBody Modeling System*. In: *Simulation Modelling Practice and Theory* 14 (2006), Nr. 8, S. 1100–1111

[3] DELP, S.; LOAN, J.: *A computational framework for simulating and analyzing human and animal movement*. In: *Computing in Science & Engineering* 2 (2000), Nr. 5, S. 46–55

[4] MIEHLING, J. ; GEIßLER, B. ; WARTZACK, S.: *Towards Biomechanical Digital Human Modeling of Elderly People for Simulations in Virtual Product Development*. In: *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* 57 (2013), Nr. 1, S. 813–817

[5] MAJID, N. A. B. A., et al.: *Musculoskeletal Analysis of Driving Fatigue* : *The Influence of Seat Adjustments*. In: *Advanced Engineering Forum* 10 (2013), S. 373–378

[6] LICHTENSTEIN, A. ; STÖßEL, C. ; CLEMENS, C.; MÜHLSTEDT, J. (Mitarb.); SPANNER-ULMER, B. (Mitarb.) : Homo Sapiens Digitalis: über den Praxiseinsatz digitaler Menschmodelle. In: *8. Berliner Werkstatt Mensch-Maschine-Systeme*.

[7] KRÜGER D. ; WARTZACK S.: Funktionsorientiertes Interaktionsmodell zur Simulation menschlicher Bewegungen während der Nutzer-Produkt Interaktion. In: Krause D.; Paetzold K.; Wartzack S. (Hrsg.): *Design for X* : *Beiträge zum 25. DfX-Symposium, Oktober 2014*. Hamburg : TuTech Verl.; Techn. Univ. Hamburg-Harburg Univ.-Bibl, 2014, S. 121–132

[8] FLUIT, R., et al.: *Prediction of ground reaction forces and moments during various activities of daily living*. In: *Journal of biomechanics* 47 (2014), Nr. 10, S. 2321–2329

[9] SKALS, S., et al.: *Prediction of ground reaction forces and moments during sports-related movements*. In: *Multibody System Dynamics* 39 (2017), Nr. 3, S. 175–195

[10] ACKERMANN, M. ; VAN DEN BOGERT, A.: *Optimality principles for model-based prediction of human gait*. In: *Journal of biomechanics* 43 (2010), Nr. 6, S. 1055–1060

[11] RASMUSSEN, et al.: *Inverse-Inverse Dynamics Simulation of Musculo-Skeletal Systems* (12th Conference of the European Society of Biomechanics). 2000

[12] FARAHANI, S., et al.: *Optimization-based dynamic prediction of kinematic and kinetic patterns for a human vertical jump from a squatting position*. In: *Multibody System Dynamics* 36 (2016), Nr. 1, S. 37–65

[13] GOPALAKRISHNAN, A.: *Over-determinate Kinematic Analysis* (Anbody Technology Webcast). Aalborg, 27. April, 2017. URL https://www.anybodytech.com/downloads/documentation/ – Überprüfungsdatum 2017-07-05

[14] ANDERSEN, M. ; DAMSGAARD, M. ; RASMUSSEN, J.: *Kinematic analysis of over-determinate biomechanical systems*. In: *Computer methods in biomechanics and biomedical engineering* 12 (2009), Nr. 4, S. 371–384

[15] MIEHLING, J., et al.: Computer Aided Ergonomics Through Parametric Biomechanical Simulation. In: *Proceedings of the ASME International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference - 2015: August 2-5, 2015, Boston, Massachusetts, USA*. New York, N.Y. : The American Society of Mechanical Engineers, 2016